

增强现实平视显示行人预警系统的视觉编码设计研究

冯自力, 杨振

(浙江理工大学 理学院, 杭州 310018)

摘要: **目的** 随着影像和雷达传感器技术的发展, 车载预警系统可以更快、更广和更高精度地实现对于行人的识别与追踪。相较于其他预警方式, 增强现实平视显示预警 (Augmented Reality Head-up Display, AR-HUD) 可以为用户提供实时、准确的预警信息并降低用户因视线切换而带来的驾驶风险, 具有较大的应用潜力。已有研究表明, 预警信息的编码方式对预警效果影响显著, 然而目前 AR-HUD 预警方式的设计标准尚未制定, 因此, 探究 AR-HUD 的预警编码方式对其应用具有重要意义。**方法** 以 AR-HUD 行人预警为例, 基于颜色、边框形状、闪烁等设计元素对预警信息进行编码设计, 从眼动指标、行为指标和主观指标对各编码方式进行多模态的量化分析和评估, 提出相应的设计建议。**结论** 采用颜色编码可以显著提升编码可识别性, 保持低漏报率的同时有较短的反应时, 而非颜色编码利用冗余编码可以增强编码可识别性; 采用形状编码会降低编码可理解性, 但会减小用户对预警的漏报率; 闪烁编码会增大对预警的漏报率和反应时; 用户主观上认为冗余编码比单维编码有更强的警示性。研究结论可为 AR-HUD 的交互设计和实车应用提供相关理论支撑。

关键词: 增强现实抬头显示; 预警信息; 编码设计; 眼动追踪

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)12-0126-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.12.013

Visual Coding Design of Augmented Reality Head-up Display Pedestrian Warning System

FENG Zi-li, YANG Zhen

(School of Science, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

ABSTRACT: With the development of imaging and radar sensor technology, vehicle-mounted early warning systems can realize the recognition and tracking of pedestrians quickly and widely with higher accuracy. Compared with other warning methods, the Augmented Reality Head-up Display (AR-HUD) can provide real-time and accurate warning information for users and reduce the driving risk caused by the sight switch, so it has a strong application potential. Studies have revealed that the coding method of warning information has a significant impact on the effect of warning. However, the design standard of AR-HUD warning method has not been established yet, so there is of great significance to explore the coding method of AR-HUD for its application. With AR-HUD pedestrian warning as an example, the warning information was coded based on color, shape, flashing, and other design elements. The multi-modal quantitative analysis and evaluation of each coding method were carried out from the eye movement index, behavior index, and subjective index and the corresponding design suggestions were put forward. The color coding can significantly improve the identifiability of the code at the time of maintaining low failure rate and short response time, while non-color coding can enhance code identifiability by redundant coding. The shape coding will reduce the comprehensibility of coding but will reduce the failure rate and the flashing code can increase the failure rate and response time of warning. Subjectively, users believe that redundant coding is more warning than uni-dimensional coding. The research results can provide theoretical support for the interaction design of AR-HUD and the application of real vehicles.

KEY WORDS: Augmented Reality Head-up Display; warning information; coding design; eye movement tracking

收稿日期: 2023-01-06

作者简介: 冯自力 (1998—), 男, 硕士生, 主攻驾驶预警系统设计与人机交互、用户体验。

通信作者: 杨振 (1987—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为驾驶人因、虚拟/增强现实中的人机交互、用户体验评测等。

随着汽车保有量的持续增长,汽车用户面临的驾驶环境日渐复杂多变。随着车联网技术(Vehicle-to-Everything, V2X)的发展,现有的高级驾驶辅助系统(Advanced Driving Assistant System, ADAS)可以利用影像和雷达传感器技术即时、高精度地收集来自车外行人、车辆和环境等的静态或动态数据,从而实现对于危险事件的识别与追踪。

在车载预警系统中,利用视觉通道呈现预警信息是一种最为常用的方式,车辆操控相关信息中90%均是以视觉形式传递的^[1]。传统的车辆视觉预警信息多呈现在车辆中控台或仪表盘上,而新型的抬头显示设备(Head Up Display, HUD)因其在优化用户注意分配方面的优势^[2],越来越多地被应用于视觉预警领域。然而,目前市场上的HUD仅在显示面板的固定位置显示导航和车辆状态等基本信息,难以通过即时、动态地标记危险事件来提高驾驶安全性。

增强现实技术(Augmented Reality, AR)将虚拟信息叠加在现实环境中,以帮助用户更好地感知环境^[3]。AR-HUD在普通的HUD中集成了增强现实信息,能够将驾驶实时的信息投射在HUD上,以第一视角向用户提供更多的信息^[4]。因此,AR-HUD能够为用户提供精准的预警和导航^[5],并且能提高用户对危险的反应能力^[6]。目前,许多品牌的汽车厂商已经开始配置AR技术的辅助驾驶系统,但目前AR-HUD预警技术尚未足够成熟。其中,AR-HUD预警的信息增强方式的视觉元素设计并无统一标准,因此,采用何种视觉编码方式才能提高预警信息的预警效果成为研究重点。本文以行人预警为例,从视觉编码的颜色、边框和闪烁等元素出发,采用眼动指标、任务绩效、主观评价三方面指标对不同编码设计的预警效果进行检验,旨在为AR-HUD的设计策略提出合理的建议。

1 AR-HUD 预警信息编码设计的研究现状

视觉编码设计主要分为单维编码和多维编码。视觉设计的单维编码主要涉及颜色编码、形状编码、大小编码、闪烁率编码,以及数字文字、亮度等在内的其他编码方式。这些编码方式早期被用于编码传统显示器上的预警信息^[7-9],例如CRT显示屏、液晶显示屏等。现有研究中AR-HUD对行人的预警采用共形图形,即图形的位置和大小随行人的位置和大小改变。有研究表明^[10],当增强图形与增强对象的大小比例不固定,可能会影响使用者对距离的判断。目前,研究者开发的原型中大多采用颜色编码、形状编码、闪烁编码来显示预警信息,AR-HUD行人预警的相关研究中,在颜色编码方面, Park等^[11]采用黄、橙、红3种颜色将不同距离的汽车对用户的威胁程度进行了编码,以此针对恶劣天气下的前车车距提示开发了一

款AR-HUD原型。Charissis等^[12]在AR-HUD原型设计中,根据系统计算的碰撞时间将不同距离的行人进行了威胁程度划分,并用红、黄、绿色的包围框对行人进行预警。在形状编码方面, Rusch等^[13]使用长方形的包围框突出显示路面上识别到的危险信息,降低了用户对行人和路牌的反应时。Kim等^[14]利用生态界面设计,通过在行人前方投射系统生成虚拟阴影的方法来改善包围框预警效果不佳的问题,有效提升了AR-HUD的预警有效性和用户的情景意识。随后, Kim等^[15]将这一设计带入真实的驾驶场景,发现与普通的HUD预警相比,用户表现出更平滑的刹车行为。在Pankratz等^[16]的研究中,针对车载传感器对道路识别精度不高、导航时的错误信息可能会降低用户对AR导航系统可用性感知的问题,利用3种箭头形状对3种识别精度进行可视化,以提高使用者对导航错误的认识,但并没有发现这种错误可视化能显著提升选择导航目标时的用户意识。在闪烁增强的使用上, Calvi等^[17]发现,相较于无预警组,在行人上方呈现红色闪烁箭头的AR视觉预警时,汽车与行人碰撞的概率减少30%,汽车与行人的撞击时间延长约50%。

多维编码即组合多种编码方式来显示一种目标信息,分为多维复合编码和多维冗余编码,多维复合编码即一个维度与另一个维度的编码值相互独立的编码,多维冗余编码是指两个或两个以上的视觉属性代表相同意义的信息编码^[8]。Alves等^[19]通过方位编码和颜色编码设计了一款动态AR-HUD车距预警提示。结果发现,相比传统的静态警告牌提示,使用AR-HUD预警的用户在反应时和车距保持上的绩效都有显著提升。Merenda等^[20]的研究则结合了倾角编码和形状编码来呈现AR预警信息,结果表明,该冗余编码的预警绩效甚至比传统的HUD差。

综上所述,目前已有很多研究提出AR-HUD界面原型,但是其重点通常在于证明原型本身的有效性,几乎没有针对预警信息编码方式的系统性研究,且尚未有研究直接对比多维冗余视觉编码和单维视觉编码在预警效果上的差异。除此之外,已有原型应用的驾驶场景通常只有一个预警对象,系统在面对更加复杂的场景时是否能维持原有的结果有待进一步研究。

2 AR-HUD 预警系统视觉编码研究方法

目前,AR-HUD预警效果的研究多采用颜色、形状、闪烁等单维视觉编码元素。本研究颜色编码采用橙色和红色两种, Park等^[11]在研究中采用橙色预警表示中等程度威胁的目标,采用红色表示高威胁的目标,且红色在交通规则中具有警示性含义,符合用户的认知习惯。形状编码则采用长方形和三角形两种形状,有研究从等直径和等面积两个角度比较不同形状

的可辨别性,结果表明,三角形是最容易辨认的图形^[20],且在交通规则中警示性指示牌通常采用三角形,符合用户的认知习惯;而采用长方形将预警对象框出是当前研究中常见的预警方式^[13-14]。闪烁编码在AR-HUD领域中的研究较少,美军舱内仪表盘的设计标准建议闪烁频率在3~5 Hz^[21],但本研究预实验中发现闪烁频率设定为5 Hz时,增强框的闪烁频率过低,因此调整至6 Hz。本文在上述研究的基础上对3种单维编码及3种编码方式组合成的多维冗余编码进行比较。

2.1 实验设计

实验采用单因素8水平被试内设计,自变量为AR-HUD的视觉编码设计,即无编码、颜色编码、形状编码、闪烁编码、颜色+闪烁编码、形状+闪烁编码、

颜色+形状编码、颜色+形状+闪烁编码8个水平,如图1所示。AR-HUD增强框的初始状态均为橙色长方形,橙色长方形增强框会叠加在人行道两边的行人上,当行人由静止变为移动时增强框出现变化。

实验的因变量包括眼动指标(首次进入时间、首次注视时间)、行为绩效(漏报率、反应时)和主观评价。

首次进入时间指的是以变化后的增强框为兴趣区,用户视线进入兴趣区所用的时间,其表示编码的可识别性,时间越短表明用户能更快地注意到变化,反映了不同设计在增强框变化瞬间对注意的捕获能力^[22]。首次注视时间指的是视线进入兴趣区后第一个注视点的持续时间,表示编码的可理解性,时间越短表明用户能更快地理解编码信息,反映了不同设计被用户理解的速度^[23]。

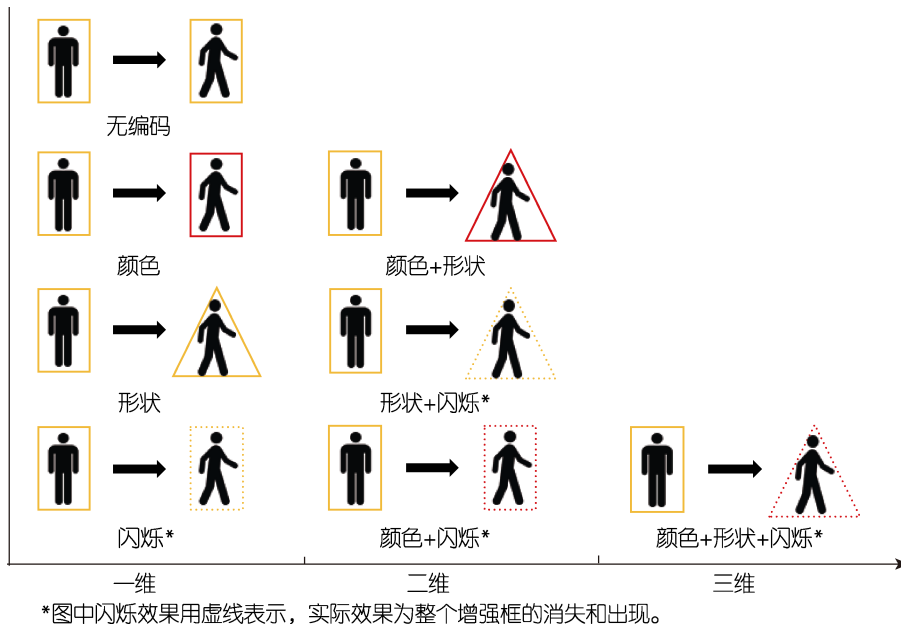


图1 实验中的编码设计
Fig.1 Coding design in experiment

漏报率统计的是当行人移动时用户没有发现的概率,漏报率越低越好,反映了用户在一定时间内发现危险的可能性。反应时是用户发现行人到按下按键所用的全部时间,反应时越短越好,反映了用户整体认知速度。

主观评价从可识别性、警示性、过度注意、驾驶环境遮挡、呈现恼人性5个方面进行测量^[24],采用李克特七点量表,1代表完全不同意,2代表比较不同意,3代表有点不同意,4代表不同意也不反对,5代表有点不同意,6代表比较同意,7代表完全同意。

2.2 实验被试

被试选取31名在校学生,男性11人,女性21人,年龄在18~26岁之间(年龄平均值 $M=22.129$,年龄标准差 $SD=2.217$)。所有被试均为右利手,均持

有机动车驾驶证,矫正视力正常。

2.3 实验设备

电脑:包括64位操作系统、16G内存2.9 GHz处理器、16寸1920*1080分辨率LED显示屏(屏幕亮度:300 cd/m²,实验室光照强度:210 cd/m²)、键盘、鼠标;SMI RED-m便携式眼动仪:采样频率1000 Hz,如图2所示。

2.4 实验材料

为更好地控制实验场景中的视觉元素,使用驾驶模拟视频作为实验材料。首先在STSIM3驾驶模拟系统上编制了8个驾驶场景,在每个场景中用户会驶过一段斑马线,斑马线两侧分别站2人,4人中只有1人会穿越马路。编制完成后,由一位有驾照的实验人



图 2 实验场地
Fig.2 Experiment platform

员进行驾驶并录制成视频。视频中车辆要求以 60 km/h 的速度匀速行驶, 程序已修改为不会与车辆和行人发生碰撞。录制完成后, 对视频中马路两侧的 4 个行人添加预警信息, 8 个场景下分别添加 8 种不同的编码设计。在车距离行人 45 m 时, 采用橙色方框标记 4 个静止的行人。其中一名行人距离车 30 m 时穿越马路, 当行人开始移动, 该行人的橙色方框变为不同的编码设计, 场景如图 3 所示。8 个场景的呈现顺序采用拉丁方设计进行排列以消除顺序效应对实验结果的影响, 每个场景重复两次。在每种顺序中随机插入 12 个空白试次, 即 4 个行人均静止不动(不会过斑马线), 以防止被试产生预期影响实验结果。最终每个被试需要完成 28 个试次, 共持续 20 分钟。



注: 左边为场景示意图, 右边为实验中的真实场景。

图 3 实验材料中的驾驶场景
Fig.3 Driving scenes in experimental materials

2.5 实验流程

先填写人口学相关信息, 被试入座后, 进行眼动仪的佩戴和调试。向被试介绍引导语, 要求发现行人横穿马路后立刻按键, 每次按键后需要填写有效性问卷。确认被试理解要求后进行练习, 待熟悉后进入正式组实验, 整个实验共 28 个试次, 每个试次结束后均需要填写可用性问卷, 如图 4 所示。

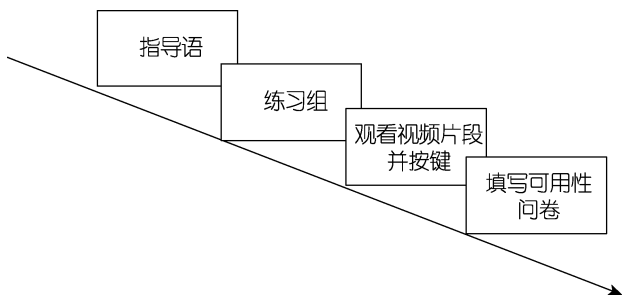


图 4 实验流程
Fig.4 Experimental process

3 实验结果和分析

实验结果将分别从眼动指标、行为指标、主观评价来对 8 种不同视觉编码设计的预警效果进行全面评价。

3.1 眼动指标

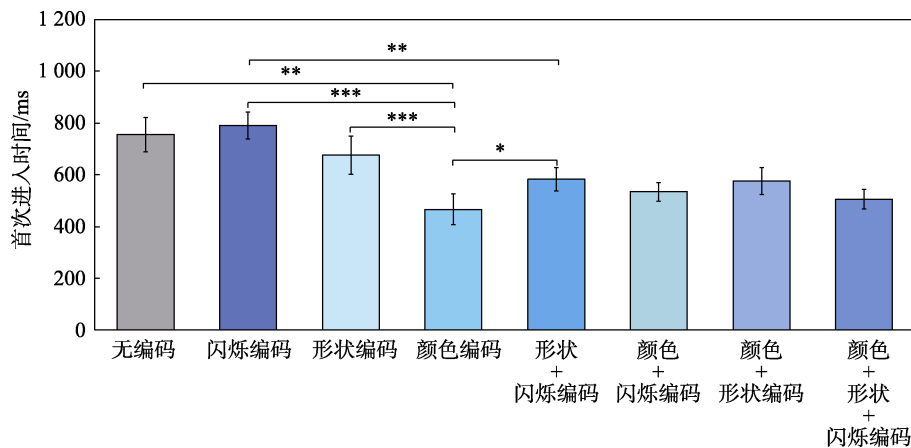
本研究在分析眼动数据时采用广义估计方程 (Generalized Estimating Equation, GEE) 分析视觉编码元素对不同因变量的影响, 而非采用重复测量方差分析, 原因在于: 包括方差分析在内的一般线性模型要求变量的总体分布满足正态分布, 且有缺失值的个案不能计入重复测量方差分析中, 而本研究中眼动数据的分布不满足正态分布前提, 另外, 由于存在被试未注意过马路行人的现象, 会导致眼动指标的缺失, 但这种缺失也属于被试的合理反应之一。因此, 上述原因导致一般线性模型无法满足处理要求, 需要采用广义模型进行处理。

3.1.1 首次进入时间

各编码设计首次进入时间的描述统计见表1。编码设计的主效应显著(卡方值 $\chi^2(7)=17\ 434.904$, 显著性 $p<0.001$)。对比发现,颜色编码下首次进入时间显著短于形状+闪烁编码、形状编码、无编码、闪烁编码(显著性 $ps<0.05$),而形状+闪烁编码显著短于形状编码、无编码、闪烁编码($ps<0.05$),如图5所示。

表1 各编码首次进入时间的描述性统计
Tab.1 Descriptive statistics of time of each code for the first entry

编码类别	首次进入时间 ($M\pm SD$) /ms
无编码	755.48±66.11
闪烁编码	791.46±73.68
形状编码	675.35±51.81
颜色编码	466.55±38.08
形状+闪烁编码	582.77±44.81
颜色+闪烁编码	534.33±59.68
颜色+形状编码	575.56±36.17
颜色+形状+闪烁编码	505.35±51.94



注: *表示 $0.01 < P < 0.05$; **表示 $0.001 < P < 0.01$; ***表示 $P < 0.001$ 。

图5 不同编码设计的首次进入时间

Fig.5 Time of different coding designs for the first entry

3.1.2 首次注视时间

各编码设计首次注视时间的描述统计见表2。编码设计的主效应显著($\chi^2(7)=34.859$, $p<0.001$),对比发现,颜色编码下首次注视时间显著小于形状编码、颜色+形状+闪烁编码、颜色+形状编码($ps<0.05$),如图6所示。

上述结果表明,无编码、颜色编码、颜色+闪烁编码、闪烁编码、形状+闪烁编码的首次注视时间较短,颜色+形状编码、颜色+形状+闪烁编码、形状编码首次注视时间较长。形状编码会增加用户理解编码信息的时间,首次注视时间较长的3种编码方式均使用了形状编码。人在识别和区分形状时主要根据形状的3个方面,即几何构成元素的类型、邻接状态、连

上述结果表明,颜色编码、颜色+形状+闪烁编码、颜色+闪烁编码、颜色+形状编码首次进入时间较短、形状+闪烁编码次之,形状编码、无编码和闪烁编码较长。颜色编码在视觉可识别性上有显著优势,非颜色编码可以通过冗余编码提高在视觉上的可识别性。首次进入时间较短的4种编码设计不论是否为冗余编码,只要包含了颜色编码都可以产生足够的刺激变化量,将用户的注意力快速集中在移动的行人上。行人通常会出现在人行横道的两端而非中间,在用户视网膜上的投影位于副中央窝或边缘视觉区,相比闪烁和形状,颜色上的变化在副中央窝或边缘视觉区更容易被察觉,更易引发用户的视感觉^[25]。而形状+闪烁编码的首次进入时间小于形状编码、无编码和闪烁编码,表明非颜色编码可以通过冗余编码来增强视觉可识别性。在实际应用时,应该根据驾驶的需求,对预警对象的威胁性进行等级划分,用颜色编码凸显威胁程度较大的目标,颜色变化最先得到注意,当界面使用的颜色数量到达上限或无法使用颜色编码时,可以合理使用冗余编码来改善非颜色编码刺激变化量的不足。

表2 各编码首次注视时间的描述统计
Tab.2 Descriptive statistics of time of each code for the first fixation

编码类别	首次注视时间 ($M\pm SD$) /ms
无编码	461.31±44.24
闪烁编码	420.65±48.33
形状编码	515.63±45.53
颜色编码	374.44±51.69
形状+闪烁编码	477.72±41.59
颜色+闪烁编码	381.57±33.92
颜色+形状编码	562.37±45.67
颜色+形状+闪烁编码	542.54±43.95

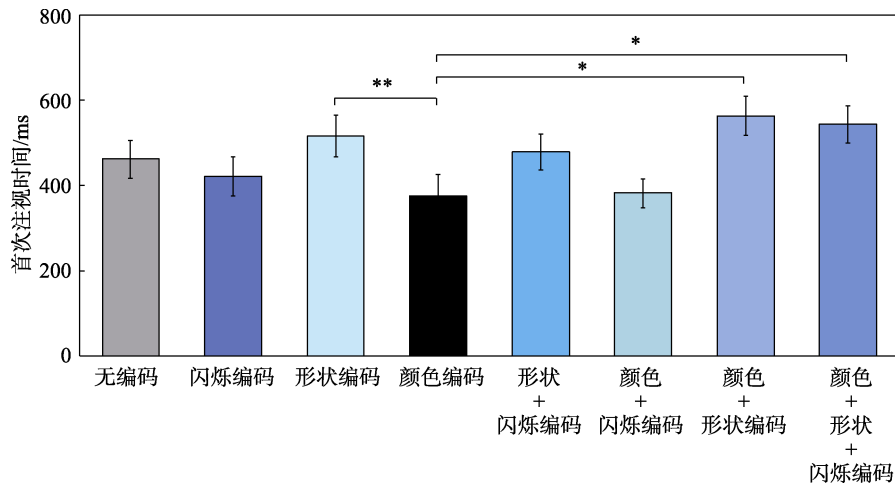


图 6 不同编码设计的首次注视时间
Fig.6 Time of different coding designs for the first fixation

接方式^[26]。识别形状时需对形状的整体几何特性进行加工,但是颜色和闪烁仅需通过形状的任意部位判断即可。设计师应该根据实际需要使用形状编码,在用户反应要求较高的情况下,同一预警对象的预警信息尽量避免使用形状编码,会延长编码信息转换为语义信息的时间。

3.2 行为指标

3.2.1 漏报率

各编码设计漏报率的描述统计见表 3。进行卡方检验,不同编码设计主效应显著 ($\chi^2(7)=49.652, p<0.001$)。对比发现,颜色+形状+闪烁编码漏报率显著低于无编码、闪烁编码、形状+闪烁编码 ($ps<0.05$),形状+闪烁编码则显著低于无编码、闪烁编码 ($ps<0.05$),如图 7 所示。

上述结果表明,颜色+形状+闪烁编码、颜色+形状编码、形状编码、颜色+闪烁编码、颜色编码、形状+闪烁编码的漏报率较低,形状+闪烁次之,无编码和闪烁编码漏报率较高。在使用颜色编码时,是否为

冗余编码都保持较低的漏报率,这与首次注视时间的结果相吻合。同时,在行人开始移动直至离开视野范围这段时间内,形状编码也能保持较低的漏报率,但和闪烁编码组成冗余编码后漏报率显著增大。闪烁编码的漏报率则比无编码的漏报率高,表明颜色编码和形状编码都有利于用户及时发现预警信息,闪烁编码则不适合用于需要快速注意的信息,一方面,闪烁

表 3 各编码漏报率的描述统计
Tab.3 Descriptive statistics of failure rate of each code

编码类别	漏报率/%
无编码	31
闪烁编码	34
形状编码	5
颜色编码	15
形状+闪烁编码	16
颜色+闪烁编码	10
颜色+形状编码	5
颜色+形状+闪烁编码	3

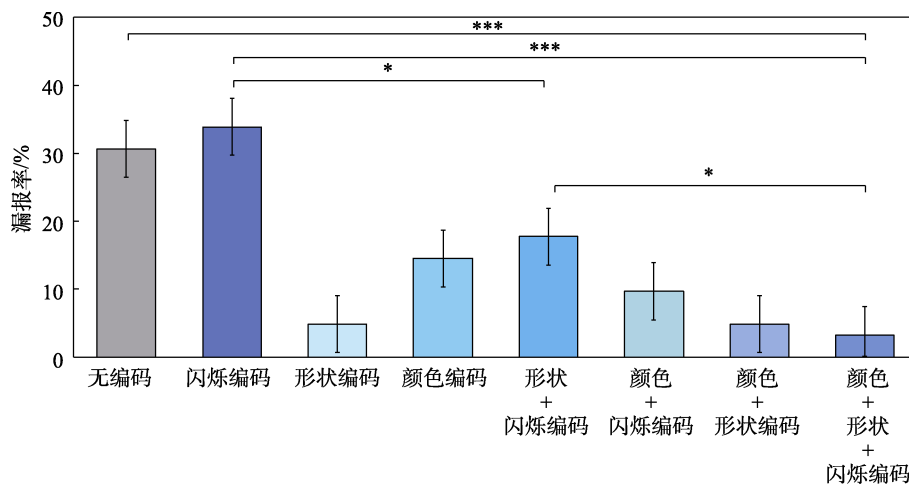


图 7 不同编码设计的漏报率
Fig.7 Failure rate of different coding designs

效果为增强框的消失与出现,意味着含闪烁效果的预警信息总呈现时间仅为不含闪烁效果的一半,大大缩短了预警信息的呈现时间。另一方面,根据被试的注视点轨迹,车辆在接近人行道时,被试的注视点会在人行道两端快速切换以搜索移动的行人,当注视点在兴趣区内时增强框处于消失状态,会导致用户无法捕捉到预警信息。实验结束后,半数被试提到完全没注意到闪烁效果,部分被试提到闪烁时感觉预警信息消失,印证了以上解释。闪烁编码的结论与 Calvi 等^[17]的研究结果完全相反,这是因为其研究中采用两车道,且仅有一个行人作为预警对象,而本研究采用了4车道4行人,场景更为复杂,用户视线的横向搜索范围更大。闪烁编码无法应对更为复杂的驾驶情境,应使用持续稳定的编码方式来呈现重要的预警信息。

3.2.2 反应时

各编码设计按键反应时的描述统计见表4。进行

单因素重复测量方差分析,不同编码设计的主效应显著 ($F(7,12)=8.828, p<0.001$, 偏 $\eta^2=0.837$), 即不同编码设计对反应时有显著影响。对比发现,颜色+形状编码下反应时显著小于形状+闪烁编码、形状编码、闪烁编码 ($ps<0.05$), 如图8所示。

表4 各编码反应时的描述性统计
Tab.4 Descriptive statistics of response time of each code

编码类别	反应时 ($M\pm SD$) /s
无编码	1.10±0.07
闪烁编码	1.63±0.13
形状编码	1.28±0.06
颜色编码	1.05±0.06
形状+闪烁编码	1.17±0.05
颜色+闪烁编码	1.10±0.04
颜色+形状编码	0.92±0.04
颜色+形状+闪烁编码	1.03±0.06

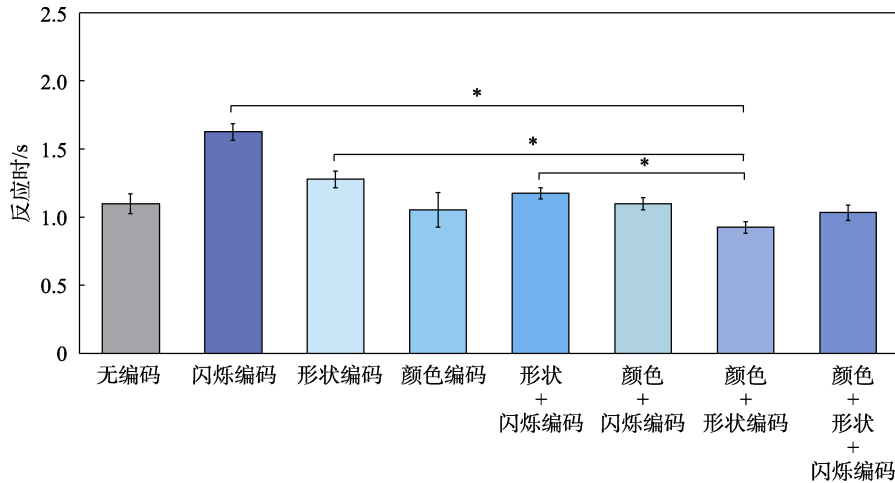


图8 不同编码设计的反应时
Fig.8 Response time of different coding designs

上述结果表明,颜色+形状编码、颜色+形状+闪烁编码、颜色编码、颜色+闪烁编码、无编码的反应时较短,形状+闪烁编码、形状编码、闪烁编码的反应时较长。含有颜色编码的设计反应时最短,整体认知速度最快,但颜色编码和含有颜色的冗余编码之间的反应时没有差异。这一结论与 Jubis 等^[27]的研究相似,可能的解释是任务较为简单,出现了天花板效应。虽然使用颜色编码的反应时在统计学上没有显著小于无编码,但换个角度来看,处理颜色编码没有使用用户的认知速度变慢,且极大降低了漏报率。

3.3 主观评价分析

主观评价通过可用性问卷进行测试,分别测试5个方面:可识别性、警示性、过度注意、驾驶环境遮挡、恼人性,采用单因素方差分析,发现不同编码方式仅在可识别性 ($F(7,12)=7.829, p<0.001$, 偏 $\eta^2=0.820$)、警示性 ($F(7,12)=10.485, p<0.001$, 偏

$\eta^2=0.859$) 上存在显著差异。

各编码设计下的可识别性见表5。对比发现,颜色+形状编码下可识别性评分显著大于无编码、形状编码、闪烁编码、形状+闪烁编码 ($ps<0.05$), 如图9所示。

表5 各编码可识别性的描述统计
Tab.5 Descriptive statistics of identifiability of each code

编码类别	可识别性 ($M\pm SD$)
无编码	3.29±0.36
闪烁编码	3.66±0.39
形状编码	4.18±0.31
颜色编码	4.90±0.33
形状+闪烁编码	4.24±0.27
颜色+闪烁编码	5.00±0.33
颜色+形状编码	5.50±0.27
颜色+形状+闪烁编码	5.45±0.23

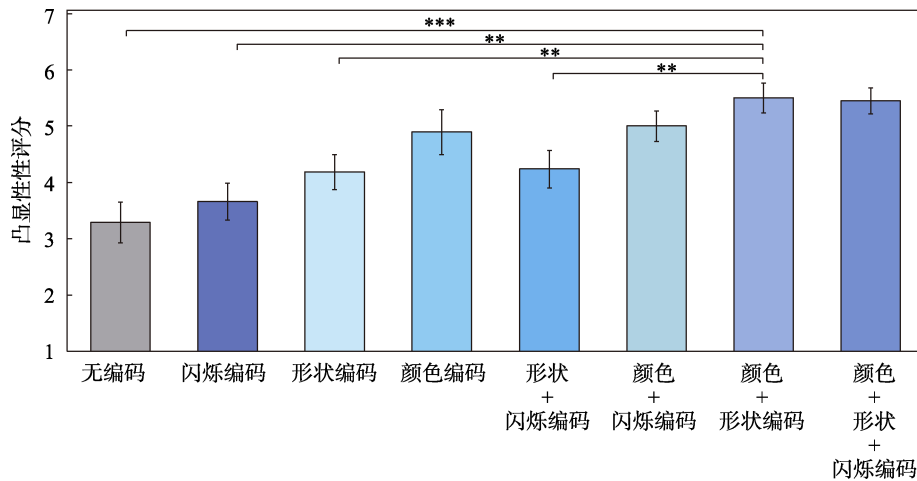


图 9 不同编码设计的可识别性
Fig.9 Identifiability of different coding designs

上述结果表明, 颜色编码、颜色+闪烁编码、颜色+形状+闪烁编码、颜色+形状编码可识别性较高, 形状+闪烁编码、形状编码、闪烁编码、无编码可识别性较低, 这一结果和首次注视时间完全呼应。用户主观上认为, 当增强框的颜色发生变化时最容易被注意到。

各编码设计下的可识别性见表 6。对比发现, 颜色+形状编码下警示性得分显著大于无编码、闪烁编码、形状+闪烁编码、形状编码、颜色编码 ($p_s > 0.05$), 无编码显著小于颜色编码 ($p < 0.05$), 如图 10 所示。

上述结果表明, 用户认为采用颜色+闪烁编码、颜色+形状编码、颜色+形状+闪烁编码的警示性较高, 颜色编码次之, 无编码、形状编码、闪烁编码、形状+闪烁编码的警示性较低。从用户体验的角度来看, 警示较快的 3 种编码方式均为包含颜色编码的冗余编码, 用户主观上认为包含颜色编码的冗余编码比颜色编码警示效果更强。警示性和反应时存在显著负相关 (相关性 $r = -0.0385$, 显著性 $p < 0.001$), 即反应时越

短警示性越高, 但在反应时中颜色编码和包含颜色的冗余编码之间并无显著差异。在实际设计时, 可以通过冗余编码提高产品感知可用性, 但需注意不同编码方式间的适配性, 不适合的组合会对原有的预警效果产生负面影响^[28]。

表 6 各编码可警示性的描述统计
Tab.6 Descriptive statistics of warning of each code

编码类别	警示性 ($M \pm SD$)
无编码	3.42±0.42
闪烁编码	3.61±0.47
形状编码	4.13±0.32
颜色编码	5.34±0.23
形状+闪烁编码	3.87±0.34
颜色+闪烁编码	5.47±0.28
颜色+形状编码	5.76±0.23
颜色+形状+闪烁编码	5.58±0.20

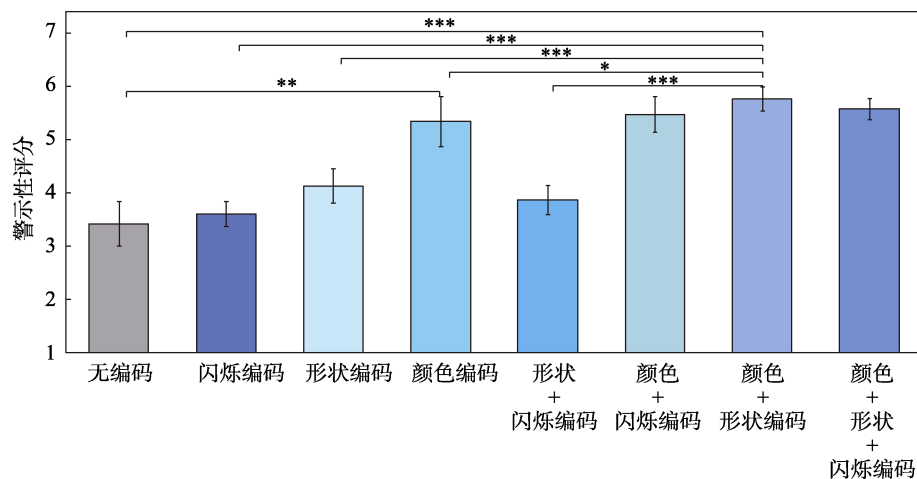


图 10 不同编码设计的警示性
Fig.10 Warning of different coding designs

4 AR-HUD 预警信息设计建议

本研究以行人预警为例,采用眼动、行为、主观三方面系统评估了多种编码方式的 AR-HUD 预警有效性。研究表明:1)采用颜色编码可以显著提升编码可识别性,在低漏报率的同时有较短的反应时,而非颜色编码采用冗余编码可以增强编码可识别性。2)采用形状编码会降低编码可理解性,但会降低用户对预警的漏报率。3)闪烁编码会增加预警的漏报率和反应时。4)用户主观上认为冗余编码比单维编码有更强的警示性。

依据以上结论提出对 AR-HUD 预警信息的编码设计建议:颜色编码是用来呈现预警信息的必要编码方式,不论是否冗余、与何种编码组合为冗余都有较好的预警效果。闪烁编码则不建议采用,在复杂环境下用户不能及时注意到预警信息。形状编码则需要设计师酌情使用,不同的驾驶场景有着不同驾驶要求,导致用户的驾驶需求也不同,例如:注重反应速度、编码信息需要被快速理解的情况下,尽量不使用形状编码,编码方式尽量简单。对反应速度要求相对较低、但注重驾驶安全时,则需要在使用颜色编码的基础上使用形状编码,虽然用户需要花费更多时间理解编码信息,但是能提升用户发现危险的概率,满足安全驾驶的要求。满足不同驾驶需求的推荐编码方式总结如图 11 所示。在使用形状编码时,形状本身的拓扑结构、形状在语义的具体性、不同形状间的相似性、形状的线宽等需要设计师根据实际的驾驶需求进一步设计改进,帮助用户快速建立清晰的映射关系,快速触发反应。

	颜色	形状	闪烁	冗余
预警信息理解速度快	✓	✗	✗	✗
预警信息理解速度慢 但易被发现	✓	✓	✗	✓
*根据驾驶需求进行编码推荐	✓ 推荐	✗ 不推荐		

图 11 针对不同驾驶需求的推荐编码方式

Fig.11 Recommended coding methods for different driving requirements

5 结语

从眼动指标、行为指标、主观评价 3 个方面对 AR-HUD 预警信息编码设计进行了系统科学的评价,探究了不同编码方式对预警效果的影响,旨在提高 AR-HUD 预警信息的有效性,为今后 AR-HUD 交互界面设计标准提供理论参考。本研究结果为 AR-HUD 预警的信息编码设计提供了一定的设计参考,但受实验条件等因素的影响,实验结论存在一定局限性。该研究在模拟环境中进行,实验室的光照环境相对稳定,而真实驾驶环境中的光照环境或 HUD 的显示背

景对比度均存在变化,因此本研究的结果推广存在一定局限,未来可以在生态性更高的环境中进一步验证。比如颜色编码方面,可以探究不同环境因素(如照度、对比度等)对颜色编码预警有效性的影响;在形状编码方面则可以对形状自身的拓扑性质、内容具象性等进行深入研究。在实验任务的设置上,也可以通过改变移动行人的数量和速度来探究任务难度对编码设计有效性的影响。

参考文献:

- [1] SUMMALA H, LAMBLE D, LAAKSO M. Driving Experience and Perception of the Lead Car's Braking when Looking at In-Car Targets[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 1998, 30(4): 401-407.
- [2] WEGE C, WILL S, VICTOR T. Eye Movement and Brake Reactions to Real World Brake-Capacity Forward Collision Warnings—A Naturalistic Driving Study[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2013, 58: 259-270.
- [3] 郑华斌. 基于增强现实的交互式应用系统[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
ZHENG Hua-bin. Interactive Application System Based on Augmented Reality[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [4] NG-THOW-HING V, BARK K, BECKWITH L, et al. User-Centered Perspectives for Automotive Augmented Reality[C]//2013 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality - Arts, Media, and Humanities (ISMAR-AMH). Adelaide, SA, Australia: IEEE, 2013: 13-22.
- [5] LEE J W, PARK B J, YOON C R, et al. A Study of Issues and Considerations for Development of a Vehicle AR System[C]//2015 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Jeju, Korea (South): IEEE, 2015: 1160-1162.
- [6] HWANG Y, PARK B J, KIM K H. The Effects of Augmented-Reality Head-up Display System Usage on Drivers? Risk Perception and Psychological Change[J]. *ETRI Journal*, 2016: 757-766.
- [7] HITT W D. An Evaluation of Five Different Abstract Coding Methods—Experiment IV[J]. *Human Factors: the Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 1961, 3(2): 120-130.
- [8] NOWELL L T. Graphical Encoding for Information Visualization: Using Icon Color, Shape, and Size To Convey Nominal and Quantitative Data[D]. Virginia: Virginia Tech Dept, 1997.
- [9] SWIERENGA S J, BOFF K R, DONOVAN R S. Effectiveness of Coding Schemes in Rapid Communication Displays[J]. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 1991, 35(20): 1522-1526.
- [10] SMITH M, DOUTCHEVA N, GABBARD J L, et al. Optical See-through HUDs Effect on Depth Judgments

- of Real World Objects[C]//2015 IEEE Virtual Reality (VR). Arles, France: IEEE, 2015: 285-286.
- [11] PARK B J, LEE J W, YOON C, et al. Augmented Reality and Representation in Vehicle for Safe Driving at Night[C]//2015 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). Jeju, Korea (South): IEEE, 2015: 1261-1263.
- [12] CHARISSIS V, PAPANASTASIOU S, MACKENZIE L, et al. Evaluation of Collision Avoidance Prototype Head-Up Display Interface for Older Drivers[C]//International Conference on Human-Computer Interaction. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011: 367-375.
- [13] RUSCH M L, JR M C S, GAVIN P, et al. Directing Driver Attention with Augmented Reality Cues[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2013, 16: 127-137.
- [14] KIM H, GABBARD J L. Assessing Distraction Potential of Augmented Reality Head-up Displays for Vehicle Drivers[J]. *Human Factors*, 2022, 64(5): 852-865.
- [15] KIM H, ANON A M, MISU T, et al. Look at Me: Augmented Reality Pedestrian Warning System Using an In-Vehicle Volumetric Head up Display[C]//Proceedings of the 21st International Conference on Intelligent User Interfaces. Sonoma, California, USA. New York: ACM, 2016: 294-298.
- [16] PANKRATZ F, DIPPON A, COSKUN T, et al. User Awareness of Tracking Uncertainties in AR Navigation Scenarios[C]//2013 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). Adelaide, SA, Australia: IEEE, 2013: 285-286.
- [17] CALVI A, D'AMICO F, FERRANTE C, et al. Effectiveness of Augmented Reality Warnings on Driving Behaviour Whilst Approaching Pedestrian Crossings: A Driving Simulator Study[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2020, 147: 105760.
- [18] ALVES P R J A, GONÇALVES J, ROSSETTI R J F, et al. Forward Collision Warning Systems Using Heads-up Displays: Testing Usability of Two New Metaphors[C]//2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Workshops (IV Workshops). Gold Coast, QLD, Australia: IEEE, 2013: 1-6.
- [19] MERENDA C, KIM H, TANOUS K, et al. Augmented Reality Interface Design Approaches for Goal-Directed and Stimulus-Driven Driving Tasks[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2018, 24(11): 2875-2885.
- [20] 刘伟, 庄达民, 柳忠起. 人机界面设计[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2011.
LIU Wei, ZHUANG Da-min, LIU Zhong-qi. *Man-Machine Interface Design*[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2011.
- [21] Department of Defense Design Criteria Standard (Human Engineering): MIL-STD-1472G[S]. USA: Department of Defense, 2012.
- [22] 吴磊, 苏瑶, 盛芹芹, 等. 基于眼动追踪的AR辅助装配指示符号影响机制研究[J]. *包装工程*, 2022, 43(4): 45-51.
WU Lei, SU Yao, SHENG Qin-qin, et al. Influence of Augmented Reality Assembly Indicators Symbol Based on Eye Tracking[J]. *Packaging Engineering*, 2022, 43(4): 45-51.
- [23] 郑束蕾, 陈毓芬, 杨春雷, 等. 地图个性化认知适度的眼动试验评估[J]. *测绘学报*, 2015, 44(B12): 27-35.
ZHENG Shu-lei, CHEN Yu-fen, YANG Chun-lei, et al. Quantitative Evaluation of Personalized Cognition Suitability on Maps by Eye Movement Experiment[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(B12): 27-35.
- [24] 李卓, 周晓, 郑杨硕. 基于AR-HUD的汽车驾驶辅助系统设计研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2017, 41(6): 924-928.
LI Zhuo, ZHOU Xiao, ZHENG Yang-shuo. Design and Research of Vehicle Driving Auxiliary System Based on AR-HUD[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2017, 41(6): 924-928.
- [25] 李杨, 丁锦红. 视野位置及刺激特征对目标搜索影响的眼动研究[J]. *心理科学*, 2007, 30(2): 344-347.
LI Yang, DING Jin-hong. An Eye Movement Research on the Influence of Visual Region and Stimuli Characteristics during the Visual Search[J]. *Psychological Science*, 2007, 30(2): 344-347.
- [26] 李晶, 郁舒兰, 吴晓莉. 人机界面形状特征编码对视觉认知绩效的影响[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2018, 30(1): 163-172.
LI Jing, YU Shu-lan, WU Xiao-li. Effects of Shape Character Encodings in the Human-Computer Interface on Visual Cognitive Performance[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2018, 30(1): 163-172.
- [27] JUBIS R M T. Coding Effects on Performance in a Process Control Task with Uniparameter and Multiparameter Displays[J]. *Human Factors: the Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 1990, 32(3): 287-297.
- [28] HEGLIN H J. NAVSHIPS Display Illumination Design Guide. Section 2: Human Factors[R]. Naval Electronics Lab Center San Diego Ca, 1973.